

# RADARES DE BAIXA PROBABILIDADE DE INTERCEPTAÇÃO (LPI) E OS DESAFIOS PARA OS EQUIPAMENTOS DE MEDIDAS DE APOIO À GUERRA ELETRÔNICA (MAGE)

Capitão de Mar e Guerra (RM1-EN)  
Jorge Amaral Alves<sup>1</sup>

## INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica dos sistemas e sensores empregados nas guerras atuais torna imperativo o desenvolvimento de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica de um país. Especificamente, o emprego de tecnologias inovadoras em sistemas modernos de Guerra Eletrônica (GE) radar resulta em ponto de inflexão nos resultados dos combates. Tais tecnologias inovadoras permitem o emprego mais eficaz da GE radar, uma vez que viabilizam, por exemplo, o emprego de técnicas modernas de Inteligência Eletrônica (ELINT – *Electronic Intelligence*) que são baseadas em algoritmos complexos de processamento digital de sinais, como, por exemplo, a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT – *Short Time Fourier Transform*). Estas tecnologias inovadoras permitem a análise no domínio da frequência, em tempo real, dos sinais radar recebidos pelo equipamento de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE). A Figura 1 apresenta o equipamento MAGE Defensor desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), atualmente instalado na Cv Barroso, cujo projeto encontra-se sendo alterado a fim de dotar as futuras Fragatas Classe *Tamandaré* (FCT).

O surgimento de radares modernos que empregam Técnicas de Compressão de Pulsos (PCT – *Pulse Compression Technique*) ou que transmi-

tem em Onda Contínua Modulada em Frequência (FMCW – *Frequency Modulated Continuous Wave*) resultaram na quebra de um paradigma, ou seja, eliminaram a vantagem naturalmente existente no processo de detecção executado pelo MAGE em relação ao processo realizado pelo radar. Tais radares modernos são denominados radares de Baixa Probabilidade de Interceptação (LPI – *Low Probability of Interception*) [1]. As tecnologias empregadas nestes radares comprometem muito a eficácia dos processos de detecção e de identificação executados pelos equipamentos MAGE convencionais, ou seja, equipamentos desprovidos de *hardware* (HW) específico para análise intrapulso de sinais radar.

A existência de radares LPI instalados em meios navais ou mesmo em mísseis tornou imprescindível o desenvolvimento de equipamentos MAGE modernos, dotados, por exemplo, de Receptores Digitais (DRX – *Digital Receiver*) que possibilitam o emprego de algoritmos de ELINT adequados para a extração de características intrapulso de sinais radar [2].

A Figura 2 apresenta o Radar RAN-20S instalado nas Fragatas Classe *Niterói* (FCN), que emprega PCT.

Este artigo procura enfatizar as características necessárias a um equipamento MAGE de modo a permitir a detecção eficaz de sinais de radares modernos, também denominados radares de baixa probabilidade de interceptação (LPI – *Low Probability of Interception*).

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Mestre em Ciência da Computação pela Naval Postgraduate School (NPS).



Figura 1. MAGE Defensor instalado na Cv Barroso



Figura 2. Radar RAN-20S instalado na Fragata Defensora

## CENÁRIO ATUAL: MÍSSEIS ANTINAVIO DOTADOS DE RADARES MODERNOS

A importância de um sistema ELINT moderno pode ser evidenciada, por exemplo, ao analisarmos o ocorrido em 26 de agosto de 2020 com o lançamento de mísseis balísticos de médio alcance chineses sobre o Mar do Sul da China [3]. O ex-oficial chinês Wang Xiangsui relatou o ocorrido como:

... vários dias depois [após as manobras do porta-aviões], lançamos o DF-21 e o DF-26,

e os mísseis atingiram um navio que navegava ao sul das Ilhas Paracel. Pouco depois disso, um adido militar americano em Genebra reclamou [para nós] e disse que as consequências seriam graves se os mísseis atingissem um porta-aviões americano [3].

Os mísseis DF-21 lançados são Mísseis Balísticos Antinavio (ASBM – *Anti-Ship Ballistic Missile*) que empregam radares LPI nos seus sistemas de guiagem terminal (*seekers*). Tais mísseis, operacionais desde 2010, são de difícil detecção por um MAGE desprovido de ELINT moderno por empregarem tecnologia LPI [4]. A existência de mísseis modernos semelhantes aos chineses DF-21 representa uma ameaça concreta aos meios navais e demanda o premente emprego de equipamentos MAGE equipados com ELINT modernos. A Figura 3 apresenta os mísseis chineses DF-21D que empregam tecnologia LPI.

Em última análise, os sistemas de defesa de um navio devem ter capacidade para se contrapor às ameaças advindas dos mísseis antinavio. Os mísseis foram introduzidos nos cenários de guerra a partir da 2ª Guerra Mundial, e desde então diversos países começaram a desenvolver mísseis mais potentes e dotados de novas tecnologias. Dentre os principais

mísseis antinavio dotados de *seekers* com radares LPI, atualmente em operação, destacam-se: o norte-americano *Harpoon*; o francês *Exocet* (Block3); e o chinês YJ-83 [6].

A Figura 4 apresenta o míssil antinavio *Harpoon* sendo lançado do navio inglês HMS *Montrose* [7].

A Figura 5 apresenta o míssil antinavio *Exocet* Block3 instalado no navio *Halasan* da Marinha da Indonésia [8].

A Figura 6 apresenta o míssil antinavio YJ-83 sendo lançado de um navio da Marinha da Tailândia [9].

Como consequência, de modo a prover uma reação eficaz a mísseis dotados de sistemas de guiagem baseados em radares LPI, faz-se necessário dotar os equipamentos MAGE de capacidade de extração de características intrapulso presentes nos sinais dos radares LPI, ou seja, dotar os equipamentos MAGE de um DRX e de algoritmos ELINT intrapulso baseados em análise no domínio da frequência e no domínio do tempo-frequência (STFT).

## RADARES MODERNOS: RADARES DE BAIXA PROBABILIDADE DE INTERCEPTAÇÃO (LPI)

Radares LPI emitem sinais de difícil interceptação por um MAGE, ou seja, sinais tão fracos que os receptores dos MAGE não possuem sensibilidade para interceptá-los, ou seja, sinais que são capazes de “... *To see and not be seen*” [1].

Tais radares LPI transmitem sinais com potência de pico reduzida, porém mantendo a potência média transmitida no valor necessário para garantir o alcance máximo especificado. Um equipamento MAGE convencional distingue um alvo do ruído ambiente a partir do estabelecimento de um limiar de detecção (*threshold*), conforme ilustrado na Figura 7.

Na Figura 7a, nota-se que o sinal radar é detectado pelo MAGE, pois apresenta amplitude maior que o limiar de detecção do MAGE.

Entretanto, na Figura 7b, o sinal radar não é detectado, pois, além de sua amplitude ser menor que o limiar de detecção do MAGE, ainda está imerso em ruído.



Figura 3. Míssil balístico chinês DF-21D dotado de *seeker* com radar LPI [5]



Figura 4. Míssil *Harpoon* sendo lançado do navio inglês HMS *Montrose* [7]



Figura 5. Míssil *Exocet* (Block3) instalado no navio *Halasan* da Marinha da Indonésia [8]



Figura 6. Míssil YJ-83 sendo lançado de um navio da Marinha da Tailândia [9]

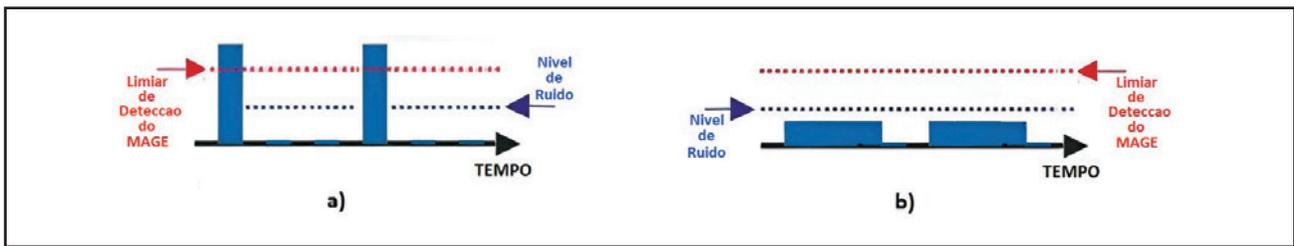


Figura 7. Limiar de Detecção de um receptor MAGE Convencional

Mesmo que o limiar de detecção do MAGE, na Figura 7b, fosse reduzido, ainda assim não seria possível a detecção do sinal radar devido ao nível de ruído existente. Esta limitação do MAGE somente é superada ao executar a análise no domínio da frequência e no domínio do tempo-frequência.

A redução da potência de pico dos sinais transmitidos pelos radares LPI pode ser obtida por meio das seguintes técnicas: Gerenciamento de Potência; Compressão de Pulsos (PCT); redução de lóbulos secundários; e aumento da largura de banda do sinal. Neste trabalho, optou-se por abordar a técnica PCT.

### Compressão de Pulso empregando Modulação Digital Por Deslocamento de Fase (PSK):

A PCT por modulação de fase consiste em se transmitir um pulso longo com codificação digital por deslocamento de fase (PSK – *Phase Shift Key*) de modo que o eco recebido, após passar por um filtro de compressão na recepção, possa ser reconstruído como um pulso curto.

O objetivo da PCT é quebrar o paradigma existente entre a largura de pulso (associado ao poder de resolução em distância) e a potência média transmitida (associada ao alcance de detecção) de um radar.

Em um radar pulsado e sem modulação intrapulso, quanto mais estreito for o pulso, melhor será a resolução em distância. A Figura 8 ilustra este poder de separação em distância. Na Figura 8a, um pulso largo não é capaz de detectar as duas aeronaves que se aproximam na mesma marcação e próximas uma da outra; enquanto que na Figura 8b as duas aeronaves são detectadas ao se empregar um pulso estreito.

Em contrapartida, quanto mais largo for o pulso, maior será a potência média transmitida e, conse-

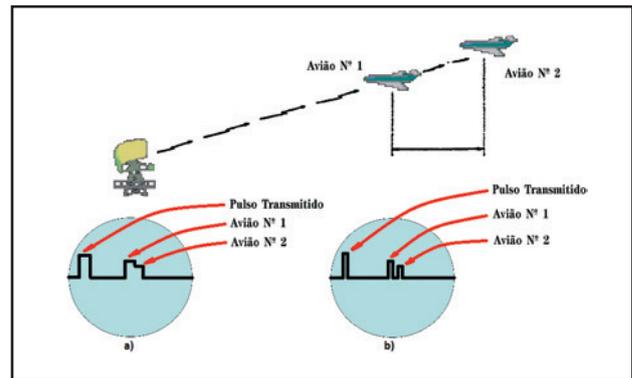


Figura 8. Poder de separação em distância: a) pulso largo; e b) pulso estreito

quentemente, maior será o alcance de detecção. Por exemplo, um navio operando em regiões de entrada de porto, ou seja, com grande tráfego de navios, emprega seu radar em pulso estreito de modo a ter uma resolução em distância de poucos metros. Entretanto, em alto mar os navios operam com pulsos largos de modo a maximizar o alcance de detecção radar. Em radares militares, de modo geral, deseja-se maximizar o alcance de detecção radar sem degradar muito a resolução em distância. Este objetivo é alcançado com o emprego da PCT [2].

Os radares que empregam PCT por deslocamento de fase (PSK), inicialmente, definem o alcance máximo desejado e qual o código da modulação em fase a ser adotado na transmissão. Posteriormente, um pulso largo é dividido em subpulsos de igual duração. Cada um destes subpulsos recebe uma fase específica, definida de acordo com o código escolhido. Portanto, por exemplo, para um código de comprimento  $N=7$  teremos 7 subpulsos com suas respectivas fases definidas pela sequência do código escolhido. A modulação em fase mais usada emprega duas fases sendo denominada codificação binária

que associa os valores +1 e -1, da sequência do código, às fases  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente. Portanto, neste caso, os subpulsos são transmitidos alternando suas fases entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , de acordo com a sequência do código adotado.

A Figura 9 ilustra este procedimento para o código Barker-7, cuja sequência é definida como: +1, +1, +1, -1, -1, +1, -1.

A Figura 10 ilustra um sinal LPI, no domínio do tempo, utilizando PCT empregando o código Barker-7.

A modulação por deslocamento de fase (PSK) pode ser feita também empregando códigos com mais de duas fases, ou seja, empregando códigos polifásicos. Os códigos Frank são os códigos polifásicos mais empregados em radar [2].

Resumindo, ao se transmitir um pulso largo empregando PCT, por exemplo, com um código Barker-7, consegue-se obter uma resolução em distância equivalente a  $1/7$  da largura de pulso (LP) largo, porém atingindo um alcance 7 vezes maior do que aquele que seria obtido com um pulso estreito (caso a LP fosse  $1/7$  do pulso largo, ou seja, necessária para obter a mesma resolução em distância). Neste caso, a Taxa de Compressão de Pulso ( $k$ ) será:  $k = 7$ .

## Modulação Analógica Linear em Frequência (LFM)

Radares pulsados que possuem seus pulsos modulados linearmente em frequência são denominados radares CHIRP (*Compressed High-Resolution Pulse*) [2]. Tais radares também são classificados como radares LPI. A Figura 11 apresenta um exemplo de sinal transmitido por um radar CHIRP.

Adicionalmente, podemos ter radares LPI que transmitem sinais de onda contínua modulada em frequência (FMCW). Sua principal característica é possuir potência de pico idêntica a sua potência média. Esta baixa potência de pico dos sinais radar transmitidos dificulta a sua detecção pelo MAGE [1].

A Figura 12 ilustra um sinal FMCW.

Em radares CHIRP e FMCW, a taxa de compressão ( $k$ ) é calculada como:  $k = BW * LP$ . Onde  $BW$  é a banda de frequência e  $LP$  é a largura de pulso.

A Figura 13 apresenta a Antena e o Transceptor do Radar FMCW *Pilot*, desenvolvido pela empresa sueca SAAB, adaptado para instalação em submarino [10].

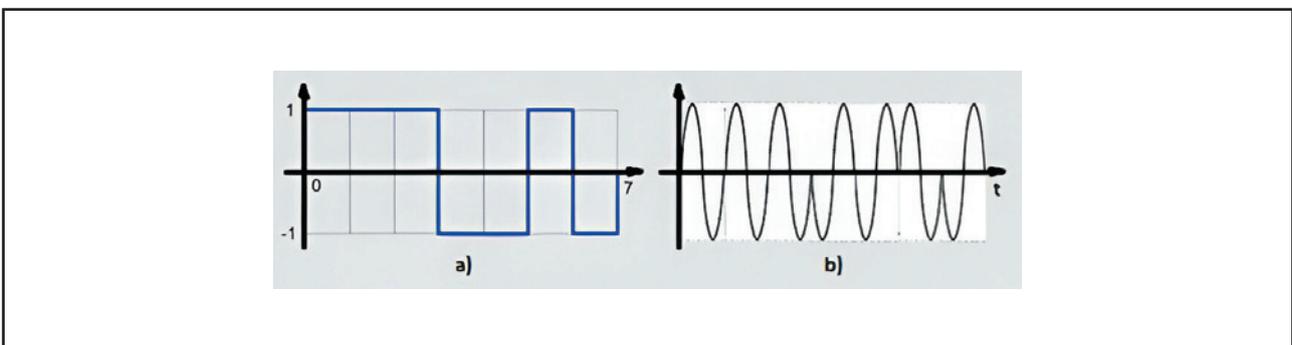


Figura 9. Representação da modulação por deslocamento de fase (PSK) com Código Barker-7

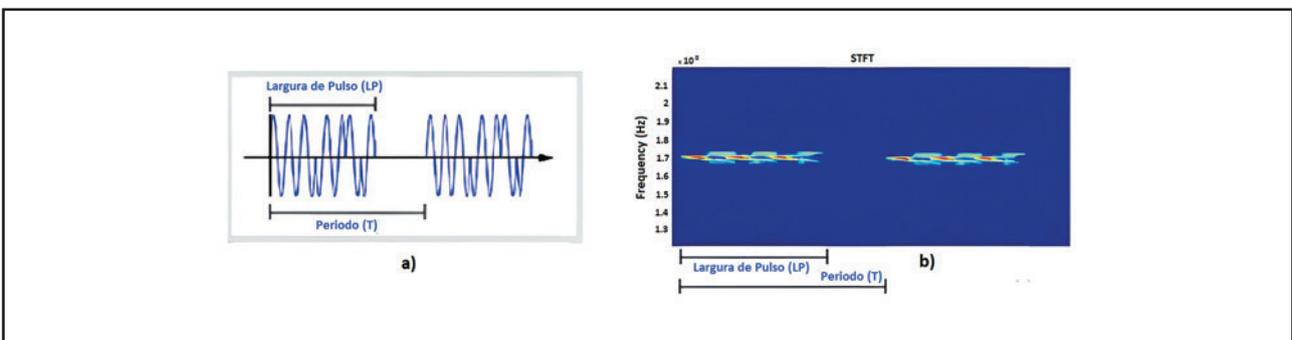


Figura 10. Sinal Barker-7: a) no domínio do tempo; e b) no domínio tempo-frequência

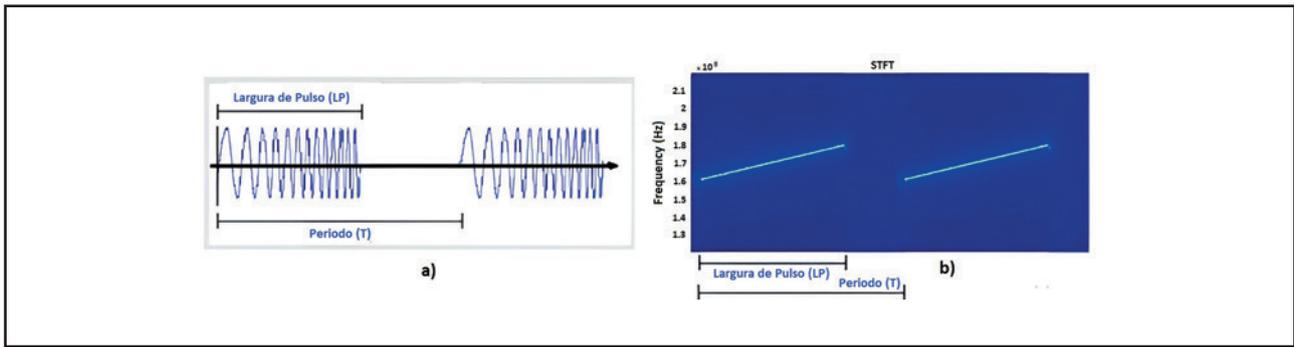


Figura 11. Sinal CHIRP: a) no domínio do tempo; e b) no domínio do tempo-frequência

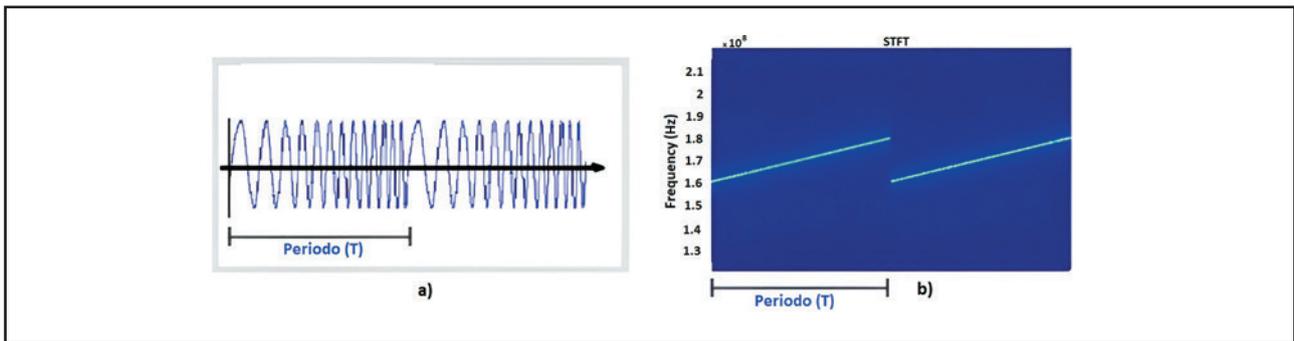


Figura 12. Sinal FMCW: a) domínio do tempo; e b) domínio do tempo-frequência

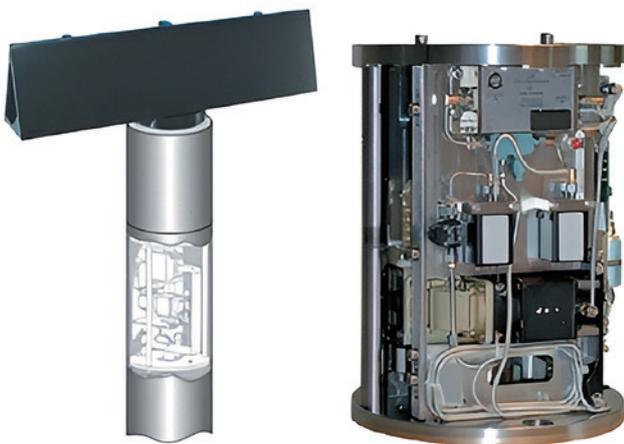


Figura 13. Radar FMCW Pilot da empresa SAAB adaptado para instalação em submarino [10]

## MAGE DE ALTO DESEMPENHO (DOTADO DE DRX)

Os equipamentos MAGE dotados de DRX são capazes de realizar funções ELINT intrapulso devido a sua rápida conversão analógica-digital e também devido a sua capacidade de análise, em tempo real, no domínio da frequência. Desta forma, tais MAGE apresentam alto desempenho na interceptação de si-

nais com SNR baixos e, portanto, são adequados para a detecção de sinais LPI.

A importância da modernização dos MAGE, com a incorporação de um DRX a fim de melhorar seu desempenho frente aos radares LPI, pode ser evidenciada por meio da Tabela 1 [1]. Nesta tabela, percebe-se que, por exemplo, um radar FMCW, tipo PILOT MK2, transmitindo com 1 W de potência média, é capaz de detectar um míssil com seção-reta-radar de 1 m<sup>2</sup> a 8,8 km de distância, ou seja, alcance equivalente ao obtido com um radar pulsado convencional com 10 KW de potência de pico que é 7,9 km.

Entretanto, ainda observando a Tabela 1, percebe-se que o radar PILOT MK2 operando com 1 W de potência média somente será detectado por um MAGE convencional (60 dBmi) a apenas 2,5 km, enquanto que o radar pulsado operando com 10 KW de potência de pico será detectado pelo mesmo MAGE convencional a uma distância 100 vezes maior (250 km). Esta situação melhora bastante com o emprego do MAGE dotado de DRX (80 dBmi), ou seja, o radar FMCW PILOT MK2 operando com 1 W de potência média poderá ser detectado a 25 km de distância.

Tabela 1. Comparação dos alcances radar e MAGE [1]

Potência de saída do Radar	Distância de detecção Radar (km)		Distância de detecção do MAGE (km)	
	Seção Retra Radar do alvo: 100 m <sup>2</sup>	Seção Retra Radar do alvo: 1 m <sup>2</sup>	MAGE com 60 dBmi (convenc.)	MAGE com 80 dBmi (alto des.)
Pilot MK2 (FMCW) 1 W	28	8,8	2,5	25
Radar pulsado convencional com 10 KW de potência de pico	25	7,9	250	2.500

A Figura 14 apresenta uma arquitetura de MAGE dotado de DRX [11]. Nesta figura é possível a identificação dos blocos básicos que constituem um MAGE com DRX: Analisador de Espectro; Circuito de Detecção e Medição; e o Conversor Analógico-Digital (A/D).

Com base nesta arquitetura, percebe-se que a principal vantagem do MAGE dotado de DRX está na sua capacidade de processamento digital de sinais e, conseqüentemente, na viabilidade da análise dos sinais radar no domínio da frequência em tempo real. Tais características são essenciais para a detecção e identificação de sinais LPI de forma eficaz.

A Figura 15 apresenta um exemplo de um sistema MAGE que emprega DRX [10].

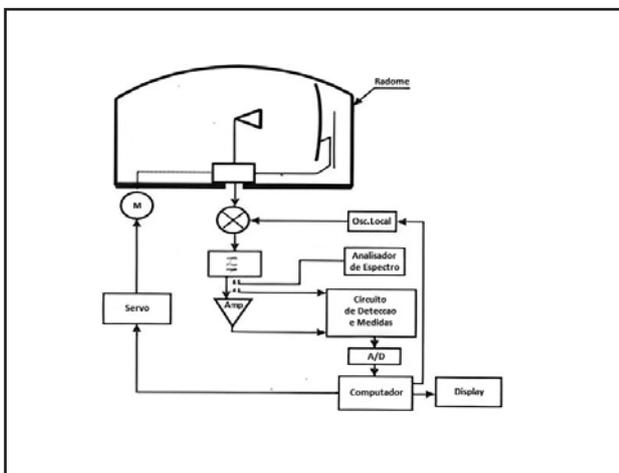


Figura 14. Arquitetura de um MAGE moderno dotado de DRX [11]

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ameaças modernas, que fazem uso de radares LPI em seus sistemas de navegação e de armas, têm se tornado cada vez mais presentes no cenário mundial. Como exemplos destas ameaças, podemos citar os mísseis antinavio e mísseis antiaéreos dotados de sistemas de guiagem terminal (*seekers*) baseados em radares LPI. Diante deste contexto, a modernização dos sistemas MAGE se torna essencial.

A possibilidade da tecnologia LPI de, através do uso de PCT, diminuir a amplitude de potência dos seus sinais, emitindo-os com uma potência média menor do que a do ruído branco presente no ambiente eletromagnético, faz com que um MAGE convencional, des-



Figura 15. MAGE ES-5080 da empresa ITT Electronic Systems dotado de DRX [10]

provido de algoritmo moderno de ELINT, não consiga interceptar o sinal e tampouco separá-lo do ruído. Este fato faz com que a tecnologia de ELINT intrapulso, baseada na análise no domínio do tempo-frequência decorrente do emprego de DRX, seja imprescindível no âmbito da GE.

Este trabalho ressalta a importância da incorporação dos algoritmos de ELINT intrapulso nos futuros equipamentos MAGE em desenvolvimento pela MB, como, por exemplo, no MAGE MK3 (Figura 16) que será instalado nas futuras FCT. Este futuro MAGE disporá de um sistema moderno de ELINT que conferirá à Esquadra a capacidade de se antepor a quaisquer ameaças modernas. Esta tecnologia elevará a MB, em matéria de GE, a uma posição de destaque dentre as esquadras das principais potências mundiais.

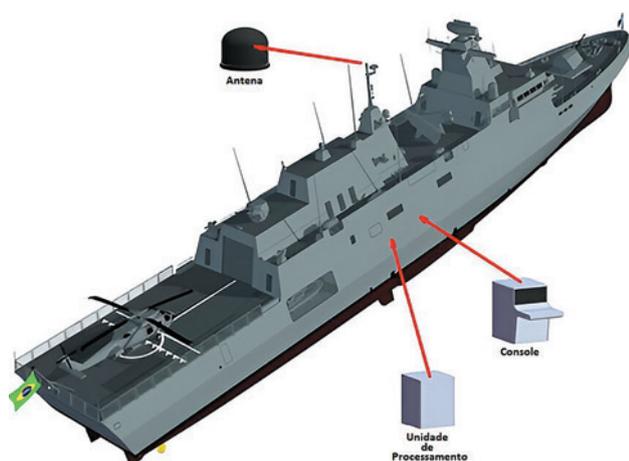


Figura 16. Projeto do MAGE Defensor MK3 para as FCT

## REFERÊNCIAS

[1] PACE, PHILLIP E., *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar*. 2ª Ed. Norwood, MA: Ed. Artech House, 2009.

[2] RICHARDS, MARK A. et al., *Principles of Modern Radar*, vol. 1, USA, Railegh: Ed. Scitech, 2010.

[3] STASHWICK, STEVEN, *Chinese Ballistic Missiles Fired into South China Sea Claimed to Hit Target Ship*. *The Diplomat*, 17 nov. 2020. Disponível em: <https://thediplomat.com/2020/11/chinese-ballistic-missiles-fired-into-south-china-sea-claimed-to-hit-target-ship/>. Acesso em: 04 set. 2023.

[4] LEVANON, NADAV e MOZESON, ELI, *Radar Signals*. Hoboken, New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2004.

[5] TREVITHICK, JOSETH, *Top Navy Intel Officer Hopes China Will Keep Dumping Money Into Anti-Ship Ballistic Missiles*. *The Drive – War Zone*, 28 jan. 2021. Disponível em: <https://www.thedrive.com/the-war-zone/38988/top-navy-intel-officer-hopes-china-will-keep-dumping-money-into-anti-ship-ballistic-missiles>. Acesso em: 04 set. 2023

[6] WESTLAKE, SAMUEL T., *The application of deep learning algorithms to longwave infrared missile seekers*. 2021. Tese de Doutorado. Cranfield University.

[7] ALLISON, GEORGE, *Royal Navy warships to lose anti-ship missiles*. *The UK Defence Journal*, 16 nov. 2016. Disponível em: <https://ukdefencejournal.org.uk/royal-navy-warships-lose-anti-ship-missiles/>. Acesso em: 04 set. 2023.

[8] *Canhão principal KRI Halasan-630 destrói alvo com sucesso*. PT PAL Indonésia, 22 nov. 2022. Disponível em: <https://www.pal.co.id/2022/11/publikasi/news-berita/meriam-utama-kri-halasan-630-sukses-hancurkan-target/>. Acesso em 04 set. 2023.

[9] *Thailand Fires Chinese YJ-83 Anti-Ship Missile*. *Aviation Week*, 11 abr. 2019. Disponível em: <https://aviationweek.com/defense-space/thailand-fires-chinese-yj-83-anti-ship-missile>. Acesso em 04 set. 2023.

[10] HEINBACK, KETHLEEN et al., *Commercially Available Low Probability of Intercept Radars and Non-Cooperative ELINT Receiver Capabilities*, Naval Postgraduate School, USA, 2014.

[11] NERI, FILIPPO, *Introduction to Electronic Defense Systems*, 2ª Ed., Londres, UK: Ed. Artech House, 2001.